УДК 621.771.23.016.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ 10ХСНД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ ЛИСТА

Р.Е. Великоцкий

ОАО "Алчевский металлургический комбинат". г. Алчевск, Украина
E-mail: velikotski@amk.lg.ua

Методом множественной корреляции получены уравнения регрессии зависимости между механическими свойствами, химическим составом и толщиной листа горячекатаной толстолистовой стали 10ХСНД. Выявлены легирующие элементы, способствующие повышению определённых механических свойств, в зависимости от толщины листа. Предложен оптимальный химический состав плавок стали 10ХСНД, для получения максимальных значений предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения. Оптимизация химического состава плавок способствует повышению предела текучести на 15...20 МПа, временного сопротивления — на 10...15 МПа, относительного удлинения — на 2...3 %.

Сталь марки 10ХСНД была разработана специально для сварного судостроения (в качестве корпусной стали). В дальнейшем сталь 10ХСНД получила широкое применение в ряде других отраслей промышленности и в первую очередь в тяжёлом машиностроении в качестве хорошо свариваемой стали высокой прочности с гарантированной величиной предела текучести 400 МПа. По химическому составу сталь 10ХСНД отличается от стали 15ХСНД более низким содержанием углерода при более высоком содержании кремния, никеля и меди. Сталь 10ХСНД (старое название данной стали СХЛ-4) в листах толщиной 4...15 мм поставляется в горячекатаном состоянии, а листах большей толщины (16...32 мм) подвергается термической обработке (закалке с последующим высоким отпуском). Готовый прокат должен выдержать испытание на холодный загиб широкой пробы на оправке $d=2s$ до 120 °C без образования надрывов и трещин и до 180 °C без поломки. Количество волокна в изломе больших образцов с надрезом при комнатной температуре испытаний должно быть не менее 30 %. Сталь 10ХСНД по ряду своих свойств превосходит сталь 15ХСНД. Из-за более низкого содержания углерода она обладает лучшей свариваемостью при более высокой прочности и ударной вязкости. С понижением температуры испытания стали 10ХСНД до –40 °C характеристики прочности несколько повышаются; пластические же свойства практически не изменяются. Для обеспечения оптимального комплекса механических свойств прокатку листовой стали 10ХСНД рекомендуется [1] производить с регулированием температуры конца прокатки. Эта температура зависит от химического состава стали и толщины листа. Наклёп (5 и 10 %) с последующим старением заметно сказывается на механических свойствах термоулучшенной стали 10ХСНД при толщине листа 28 мм. Назначение данной стали – элементы сварных металлоконструкций и различные детали, к которым предъявляются требования повышенной прочности и коррозионной стойкости с ограничением массы и работающие при температуре от –70 до 450 °C [2]. Технологические свойства [3–5]: температура прокатки (ковки), °C: начала – 1200, конца – 850. Свариваемость – сваривается без ограничений. Способы сварки: РДС, АДС под флюсом и газовой защитой, ЭШС. Обрабатываемость резанием – в нормализованном и отпущенном состоянии σ_B=560 МПа, $K_{vб.ст}$=1,12, $K_{vтв.спл}$=1,4 [6]. Склонность к отпускной хрупкости – малосклонна. Флокеночувствительность – не чувствительна. Заменитель – сталь 16Г2АФ. Вид поставки – сортовой прокат, в том числе фасонный, поковки и кованные заготовки, трубы, полоса, лист тонкий и толстый (ГОСТ 19282-73, ГОСТ 19903-74, ГОСТ 5521-76, ГОСТ 6713-75) [2].

Имеется множество работ [6, 7 и др.], посвящённых исследованию толстолистового проката низколегированных сталей, в частности стали 10ХСНД. В работе [8] авторы предлагают оптимальное содержание основных элементов в плавке стали марки 10ХСНД (%): C – 0,08...0,11; Mn – 0,6...0,8; Si – 0,8...1,1; Cr – 0,65...0,85.

Основными легирующими элементами в низколегированных сталях являются марганец и кремний, а также хром, никель, медь, которые, растворяясь в феррите, повышают прочностные характеристики (наиболее сильный из рассмотренных элементов – кремний, слабее всех никель и хром при наличии феррито-перлитной структуры) и способствуют улучшению хладностойкости (за исключением кремния). Вредное влияние кремния на хладностойкие свойства проявляется при содержании его более 0,5 %, а наиболее интенсивное изменение функции $T_{KP}=(0,04...0,30\ln\mathrm{Si})^{-1}$ имеет место при содержании Si 1 %. В связи с проблемой легирования низколегированных сталей, имеется точка зрения [9], что сами по себе легирующие элементы не улучшают механических свойств стали, а видимое улучшение при легировании вызвано влиянием элементов не на прочность, а на прокаливаемость. Эта точка зрения, совпадающая с утверждением [10], что основной функцией легирующих элементов является увеличение прокаливаемости, в какой-то степени подтверждается на группе низколегированных сталей. Однако, это мнение не подтверждается другими исследователями. Например, приводится высказывание [11], что легирующие элементы по-разному влияют на температуру и кинетику выделения цементита, на свойства матрицы, на ряд других факторов, составляющих особенности той или иной низколегированной стали. К

основным факторам, определяющим механические свойства низколегированной стали 10ХСНД с феррито-перлитной структурой, относятся: упрочнение твёрдого раствора (через растворение), величина зерна, дисперсионное твердение и количество перлита. Степень влияния каждого из отмеченных зависит от системы легирования и некоторых технологических приёмов (условий нагрева при горячей обработке давлением, температура конца прокатки и др.). В ряде случаев легирование одним элементом может влиять одновременно на несколько факторов [1, 12]. В равной степени ряд легирующих элементов может вызвать изменение одного и того же фактора, например, упрочнение твёрдого раствора, растворение марганца, кремния, меди и др. В работе [13], рассмотрена взаимосвязь между прочностью и химическим составом стали 10ХСНД с позиций теории направленной химической связи. Для характеристики химического состояния многокомпонентной металлической системы авторы [13] вводят интегральный параметр Z^y – электронный химический эквивалент состава стали [14]. Как считают авторы [13], прочность листового проката закономерно изменяется по мере увеличения степени легирования стали. Для стали 10ХСНД приводятся значения химического эквивалента для нижнего Z^y_{min}=1,224 и верхнего Z^y_{max}=1,261 пределов химических составов, что соответствует примерно значению временного сопротивления 650...680 МПа. В заключение авторы [13] делают вывод, что потенциальные возможности состава стали 10ХСНД в части получения прочности реализуются не в полной мере.

Критический обзор литературных источников показывает, что до сих пор отсутствует систематизированная информация по вопросу повышения механических свойств стали 10ХСНД путём оптимизации химического состава.

Таким образом, целью настоящей работы является: 1) выявление легирующих элементов, наиболее радикально способствующих повышению механических свойств данной стали, и 2) получение оптимального химического состава плавок в зависимости от толщины листа.

В настоящей работе исследования проводились на стали марки 10ХСНД. Статистические исследования проводились на основании 311 плавок. Выплавка стали, прокатка, метрологическое обеспечение и контроль параметров технологического процесса производились на основании технологической инструкции "Производство низколегированной стали марки 10ХСНД" (ТИ 229-МЦ-399-90). Требования по охране труда и технике безопасности соответствовали "Общим правилам для предприятий и организаций металлургической промышленности", "Правилам безопасности в прокатном производстве" и инструкциям ТБ 034-1-79, ТБ 035-1-79, ТБ 034-1-Д-1. Сталь марки 10ХСНД выплавляли в 300-тонных мартеновских печах ОАО "АМК" в соответствии с технологической инструкцией "Выплавка спокойной, полуспокойной и кипящей стали в основных мартеновских печах" (ТИ 229-СТМ-032-20-92), со следующими особенностями. Разливка стали производилась в изложницы типа 13,8СМ (развес слитка 14 т) в соответствии с технологической инструкцией "Разливка стали" (ТИ 229-СТМ-032-23-94). Посад, нагрев и выдачу слитков в нагревательных колодцах производили по режимам низколегированного металла III группы в соответствии с технологической инструкцией "Нагрев слитков в нагревательных колодцах" (ТИ 229-ПОЗ-033-104-98). Фабрикацию и назначение слитков в прокатку производили в соответствии с технологической инструкций "Производство блюмсов и слябов на обжимном стане" (ТИ 229-ПОЗ-033-30-94). Зачистку, приёмку, маркировку, складирование и передачу слябов на стан 2250 производили в соответствии с инструкцией "Производство блюмсов и слябов на обжимном стане" (ТИ 229-ПОЗ-033-30-94). Нагрев слябов производили в соответствии с технологической инструкцией "Производство толстолистовой стали на стане 2250" (ТИ 229-ПГЛ-034-109-98) по режимам для стали 2-й группы. Прокатку опытной плавки на листы толщиной 8, 10 и 12 мм производили на стане 2250 (ТЛЦ № 1) с варьированием температуры конца прокатки ($t_{КП}$) в чистовой клети в интервале температур 740...960 °С. От прокатанных раскатов отрезали пробы для изучения микроструктуры и определения механических свойств. Испытания механических свойств листов производили в соответствии с требованиями ГОСТ 5521-93 и технологических инструкций "Общий порядок отбора и комплектование проб от толстолистовой стали" (ТИ 229-067-35-96) и "Отбор проб в прокатных цехах" (ТИ 229-067-85-98).

Методом множественной корреляции были получены уравнения регрессии зависимости между механическими свойствами, химическим составом и толщиной проката стали 10ХСНД (табл. 1). На основании полученных уравнений регрессии, определены те элементы, которые способствуют повышению основных механических характеристик стали 10ХСНД.

Как видно из табл. 1 для групп листов толщиной 4...6 мм и 7...9 мм, а также для листов толщиной от 4 до 14 мм, если их включить в одну группу, наиболее тесная связь предела текучести зафиксирована с титаном (коэффициент корреляции 0,354...0,453). Далее, по мере ослабления тесноты следуют связи предела текучести с алюминием, кремнием и углеродом. Коэффициенты корреляции этих связей по их величине для всех указанных групп толщин входят в первую четвёрку. Для листов толщиной 10...14 мм предел текучести наиболее тесно связан с содержанием кремния, фосфора, марганца, углерода и алюминия, за которыми следует титан. С остальными элементами связь предела текучести горячекатаной стали 10ХСНД значительно слабее или не зафиксирована. Как видно из сопоставления значимых коэффициентов регрессии перед различными элементами, наиболее сильное влияние на величину предела текучести оказывает титан, причём это влияние

Таблица 1. *Уравнения регрессии комплексного влияния элементов на механические свойства стали 10ХСНД (переменные, от содержания которых $\sigma_т$, $\sigma_в$ и δ_5 зависит существенно – выделены жирным шрифтом)*

Толщина листа, мм	Уравнения регрессии	Коэффициент множественной корреляции, R
	Предел текучести, МПа	
4...6	$\sigma_т = 395,1 + 664,0\,\mathbf{C} - 52,6\,Mn + 52,7\,\mathbf{Si} + 191,1\,S + 190,3\,P - 9,1\,Cr - 32,9\,Ni + 53,4\,Cu + 463,9\,\mathbf{Al} + 1141,7\,\mathbf{Ti} - 16,0\,\mathbf{h}$.	0,583
7...9	$\sigma_т = 284,6 + 602,0\,\mathbf{C} + 18,03\,Mn + 132,0\,\mathbf{Si} - 619,4\,S + 174,2\,P + 2,5\,Cr + 11,8\,Ni - 9,7\,Cu + 104,6\,\mathbf{Al} + 1235,1\,\mathbf{Ti} - 9,6\,\mathbf{h}$.	0,606
10...14	$\sigma_т = 211,5 + 551,8\,\mathbf{C} - 25,0\,\mathbf{Mn} + 113,4\,\mathbf{Si} + 76,3\,S + 1979,4\,\mathbf{P} + 9,3\,Cr + 4,9\,Ni + 15,6\,Cu + 42,3\,\mathbf{Al} + 364,2\,\mathbf{Ti} - 0,73\,h$.	0,551
4...14	$\sigma_т = 310,0 + 602,5\,\mathbf{C} - 31,0\,\mathbf{Mn} + 101,0\,\mathbf{Si} + 45,6\,S + 418,8\,\mathbf{P} - 30,7\,Cr - 29,6\,Ni + 39,6\,Cu + 340,5\,\mathbf{Al} + 985,4\,\mathbf{Ti} - 4,8\,h$.	0,588
	Временное сопротивление, МПа	
4...6	$\sigma_в = 285,0 + 685,7\,\mathbf{C} + 93,8\,\mathbf{Mn} + 56,0\,\mathbf{Si} - 812,4\,S + 116,3\,\mathbf{P} + 43,9\,\mathbf{Cr} + 33,6\,\mathbf{Ni} + 49,4\,\mathbf{Cu} + 186,8\,\mathbf{Al} + 1146,7\,\mathbf{Ti} - 0,81\,h$.	0,613
7...9	$\sigma_в = 218,7 + 979,6\,C + 52,7\,\mathbf{Mn} + 74,7\,\mathbf{Si} - 276,9\,\mathbf{S} - 87,5\,\mathbf{P} + 64,9\,Cr + 72,5\,\mathbf{Ni} + 16,3\,\mathbf{Cu} + 246,2\,\mathbf{Al} + 1052,5\,\mathbf{Ti} - 6,96\,\mathbf{h}$.	0,773
10...14	$\sigma_в = 170,3 + 798,7\,\mathbf{C} + 11,4\,\mathbf{Mn} + 129,2\,\mathbf{Si} - 129,4\,S + 1394,5\,\mathbf{P} + 22,3\,\mathbf{Cr} + 99,3\,\mathbf{Ni} + 88,0\,\mathbf{Cu} + 182,3\,\mathbf{Al} + 46,3\,\mathbf{Ti} - 0,72\,h$.	0,696
4...14	$\sigma_в = 244,0 + 791,3\,\mathbf{C} + 99,0\,\mathbf{Mn} + 80,8\,\mathbf{Si} - 378,0\,S + 547,7\,\mathbf{P} + 30,8\,\mathbf{Cr} + 45,0\,\mathbf{Ni} + 71,2\,\mathbf{Cu} + 233,2\,\mathbf{Al} + 883,0\,\mathbf{Ti} - 2,25\,h$.	0,671
	Относительное удлинение, %	
4...6	$\delta_5 = 45,24 - 56,13\,\mathbf{C} - 7,47\,\mathbf{Mn} + 1,15\,\mathbf{Si} - 37,87\,S - 2,27\,\mathbf{P} - 2,27\,Cr + 3,92\,Ni - 3,94\,Cu - 8,29\,\mathbf{Al} - 78,73\,\mathbf{Ti} - 0,57\,\mathbf{h}$.	0,411
7...9	$\delta_5 = 56,84 - 36,69\,\mathbf{C} - 9,64\,\mathbf{Mn} - 5,60\,\mathbf{Si} - 76,89\,\mathbf{S} - 10,03\,P + 6,06\,\mathbf{Cr} - 6,44\,\mathbf{Ni} - 7,82\,\mathbf{Cu} - 8,10\,\mathbf{Al} - 33,69\,Ti - 0,84\,h$.	0,531
10...14	$\delta_5 = 40,68 - 8,58\,C - 0,36\,Mn - 0,94\,Si - 25,55\,S + 13,92\,P + 3,28\,Cr + 8,78\,Ni - 8,80\,\mathbf{Cu} - 20,89\,Al - 31,93\,\mathbf{Ti} - 0,72\,\mathbf{h}$.	0,592
4...14	$\delta_5 = 46,50 - 42,33\,\mathbf{C} - 7,29\,\mathbf{Mn} - 0,28\,\mathbf{Si} - 52,26\,\mathbf{S} + 12,75\,P + 0,42\,Cr + 2,46\,Ni - 9,01\,\mathbf{Cu} - 0,83\,\mathbf{Al} - 62,50\,\mathbf{Ti} - 0,52\,\mathbf{h}$.	0,549

значительно сильнее, чем влияние углерода – для листов толщиной 4...9 мм в 1,7...2,0 раза для всего интервала толщин 4...14 мм, в среднем – в 1,6 раза. Для листов толщиной 10 мм и более влияние титана, по сравнению с углеродом слабее, но более сильно, чем влияние других элементов. Менее эффективно, чем титан и углерод, но сильнее других элементов повышают предел текучести кремний и алюминий. При прочих равных условиях и увеличении содержания на 0,01 % углерод повышает предел текучести на 5...6 МПа, а титан – до 10...12 МПа. Из этого следует, что увеличение содержания этого элемента в стали до 0,020 % Ti позволило бы увеличить предел текучести на указанную величину и повысить, таким образом, выход годных листов.

Из табл. 1 следует, что к элементам, которые в наибольшей мере определяют временное сопротивление стали 10ХСНД, относятся углерод, марганец, титан, кремний, алюминий. Для листов толщиной 4...6 мм эти элементы по степени убывания тесноты зависимости от них временного сопротивления располагаются в следующей ряд: Mn – Ti – Si – C – Al, а для листов толщиной 7...9 мм в ряд: C – Ti – Al – Si – Mn. Для листов толщиной 10...14 мм наиболее существенные положительные связи временного сопротивления зафиксированы с содержаниями кремния, углерода, марганца и фосфора и менее тесные - с другими элементами. Влияние титана для этой относительно немногочисленной группы листов не отмечено. Возможно, оно проявляется через связь с другими элементами. В целом, для наиболее представительного массива листов толщиной 4...14 мм порядок расположения указанных элементов по мере уменьшения тесноты связи с ним временного сопротивления следующий: марганец – титан – углерод – кремний – алюминий. Далее следует фосфор, хром и никель, коэффициенты корреляции для которых значительно ниже. Как видно, наибольшие (и близкие) значения имеют коэффициенты регрессии при титане и углероде, а из других легирующих – при алюминии. Заметное влияние на временное сопротивление, как следует из последнего уравнения, оказывает и фосфор.

Наиболее тесно относительное удлинение горячекатаной стали 10ХСНД связано с содержанием марганца, углерода и титана. По мере уменьшения значимых коэффициентов корреляции располагаются связи относительного удлинения со следующими элементами: при толщине листов 4...6 мм: Mn – Ti – C – Si – Al; при толщине 7...9 мм: Mn – S – C – Al – Cu – Ti; при толщине 10...14 мм: Cu – Ti. Для всего интервала толщин (4...14 мм) указанная последовательность имеет следующий вид: Mn – C – Ti – Al – Cu – S – Si. Во всех случаях наблюдается существенная отрицательная связь относительного удлинения с толщиной листа. Углерод, титан и сера, как видно из этого уравнения, наиболее сильно уменьшают относительное удлинение, однако, учитывая определённый резерв указанной характеристики, это не представляется опасным. Так, увеличение содержания титана от 0,01 % в настоящее время до предельного 0,03 % уменьшило бы при прочих равных условиях удлинение на 1,2 % (абс.), но повысило бы предел текучести примерно на 20...25 МПа. Существенное влияние на относительное удлинение оказывает толщина листов. С увеличением толщины коэффициент регрессии при h растёт, то есть влияние этого фактора возрастает. В среднем увеличение толщины на 2 мм снижает относительное удлинение на 0,8...1,0 % (абс.).

Рекомендуя для повышения определённой механической характеристики те химические элементы, которые положительно влияют на предел текучести, временное сопротивление или относительное удлинение, в зависимости от толщины проката, можно увеличить комплекс механических свойств стали 10ХСНД. На основании вышеизложенного, предложен оптимальных химический состав плавок, обес-

Таблица 2. *Оптимальный химический состав стали 10ХСНД в зависимости от толщины листа*

Толщина листа, мм	Содержание химических элементов в плавке	Содержание химических элементов в плавке, %										$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Средние значения		
Предел текучести														
4...6	Среднее	0,106	0,707	0,944	0,029	0,017	0,713	0,589	0,489	0,033	0,012	436		
	Оптимальное	0,106	0,500	0,944	0,029	0,017	0,600	0,500	0,489	0,033	0,012	451		
7...9	Среднее	0,104	0,708	0,951	0,027	0,017	0,717	0,594	0,492	0,032	0,011	414		
	Оптимальное	0,104	0,708	0,951	0,020	0,017	0,717	0,594	0,400	0,032	0,011	419		
10...14	Среднее	0,108	0,701	0,915	0,026	0,017	0,692	0,580	0,480	0,034	0,011	401		
	Оптимальное	0,108	0,500	0,915	0,026	0,017	0,692	0,580	0,480	0,034	0,011	406		
4...14	Среднее	0,106	0,706	0,942	0,028	0,017	0,710	0,589	0,489	0,033	0,011	417		
	Оптимальное	0,106	0,500	0,942	0,028	0,017	0,600	0,500	0,489	0,033	0,011	429		
Временное сопротивление														
4...6	Среднее	0,106	0,707	0,944	0,029	0,017	0,713	0,589	0,489	0,033	0,012		546	
	Оптимальное	0,106	0,707	0,944	0,020	0,017	0,713	0,589	0,489	0,033	0,012		553	
7...9	Среднее	0,104	0,708	0,951	0,027	0,017	0,717	0,594	0,492	0,032	0,011		481	
	Оптимальное	0,104	0,708	0,951	0,020	0,010	0,717	0,594	0,492	0,032	0,011		484	
10...14	Среднее	0,108	0,701	0,915	0,026	0,017	0,692	0,580	0,480	0,034	0,011		516	
	Оптимальное	0,108	0,701	0,915	0,020	0,017	0,692	0,580	0,480	0,034	0,010		517	
4...14	Среднее	0,106	0,706	0,942	0,028	0,017	0,710	0,589	0,489	0,033	0,011		553	
	Оптимальное	0,106	0,706	0,942	0,020	0,017	0,710	0,589	0,489	0,033	0,011		556	
Относительное удлинение														
4...6	Среднее	0,106	0,707	0,944	0,029	0,017	0,713	0,589	0,489	0,033	0,012			37,1
	Оптимальное	0,106	0,707	1,100	0,029	0,017	0,713	0,800	0,489	0,045	0,012			38,0
7...9	Среднее	0,104	0,708	0,951	0,027	0,017	0,717	0,594	0,492	0,032	0,011			27,9
	Оптимальное	0,104	0,708	0,951	0,027	0,017	0,900	0,594	0,492	0,032	0,011			29,2
10...14	Среднее	0,108	0,701	0,915	0,026	0,017	0,692	0,580	0,480	0,034	0,011			36,1
	Оптимальное	0,108	0,701	0,915	0,026	0,035	0,900	0,800	0,600	0,034	0,011			39,0
4...14	Среднее	0,106	0,706	0,942	0,028	0,017	0,710	0,589	0,489	0,033	0,011			27,3
	Оптимальное	0,106	0,706	0,942	0,028	0,035	0,900	0,800	0,489	0,033	0,011			28,1

печивающий получение максимальных значений механических характеристик стали 10ХСНД (табл. 2).

Выводы

1. Полученные данные об оптимизации химического состава стали 10ХСНД, с целью повышения уровня механических свойств, позволили увеличить уровень значений предела текучести на 15...20 МПа, временного сопротивления – на 10...15 МПа, относительного удлинения – на 2...3 %.
2. Общее повышение механических свойств горячекатаной толстолистовой стали 10ХСНД способствует увеличению уровня выхода годных партий на 10...15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейкин И.М., Литвиненко Д.А., Рудченко А.В. Производство и свойства низколегированных сталей. – М.: Металлургия, 1972. – 256 с.
2. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
3. Материалы в машиностроении. Справочник в 6-ти т. Т. 2. / Под ред. И.В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1967. – 497 с.
4. Общемашиностроительные типовые и руководящие материалы в области технологии и организации производства. Марочник стали для машиностроения. – М.: Изд-во ИМЕТ, 1965. – 594 с.
5. Нормативы времени и режимы резания на токарные работы. Серийное производство: Альбом / УЗТМ. – Свердловск, 1973.
6. Бринза В.В., Хартман Х., Коровин А.В. Повышение точности прогнозирования механических свойств листового проката // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8–9. – С. 150–155.
7. Светличный Д., Петшик М. Модель разработки режима обжатий толстолистового стана, приспособленная к работе в системе реального времени // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 1. – С. 40–45.
8. Воропаев А.П., Хорошилов Н.М. Повышение уровня механических свойств низколегированной толстолистовой стали // Производство листа – М: Металлургия, 1972. – № 1. – С. 8–10.
9. Гуляев А.П. Металловедение и термическая обработка металлов. – 1961. – № 7. – С. 23.
10. Бейн Э. Влияние легирующих элементов на свойства стали. – М.: Металлургиздат, 1945.
11. Гольдштейн Я.Е. Низколегированные стали в машиностроении. – М.-Свердловск: Машгиз, 1963. – 240 с.
12. Pickering F.B., Gladman T. Metallurgical development in carbon Steels. Iron and Steel Inst., BISRA, Harrogate Conf., 1963. – P. 10.
13. Приходько Э.В., Наугольникова Л.М. О влиянии химического состава на прочность горячекатаного листа из стали углеродистых и низколегированных марок // Улучшение качества горячекатаной широкополосной стали. – М.: Металлургия, 1986. – С. 24–28.
14. Приходько Э.В. Электронное строение и физико-химические свойства сплавов и соединений на основе переходных металлов. – Киев: Наукова думка, 1976. – С. 60–64.